第41卷 第11期
2024年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 11
Nov. 2024

河西走廊阻沙固沙带典型荒漠植物叶功能性状

柴巧弟， 马 瑞， 王安林， 张 富， 刘 腾， 田永胜
（甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要： 本研究以河西走廊阻沙固沙带典型荒漠植物梭梭（*Haloxylon ammodendron*）和白刺（*Nitraria tangutorum*）为研究对象，通过野外调查、样品采集、室内分析与统计相结合的方法，探讨荒漠植物对干旱环境的适应策略。因此，选取民勤绿洲阻沙固沙带和高台绿洲阻沙固沙带，分别自上风向的自然植被封育保护带和下风向的乔灌防护林带，空间结构特征较为一致的阻沙固沙带，设置3个10 m×10 m的梭梭样方和3个10 m×10 m的白刺样方。分析其叶片主要参数与环境因子的空间分布特征及其相关性，旨在为评价两种荒漠植物叶功能性状对干旱环境的适应策略提供数据支撑。典型荒漠植物均可通过调整叶功能性状以适应特定生境下的土壤和气候条件，结果表明：（1）叶干物质含量（LDMC）和比叶面积（SLA）差异显著（$P<0.05$），叶有机碳（LOC）、叶氮（LN）和叶磷含量（LP）在两种生境中均呈现出极显著差异（$P<0.001$）。（2）主成分分析表明，影响民勤植物叶功能性状的前3个指标因子为LN、C:N和C:P；影响高台植物叶功能性状的前3个指标因子为LP、C:N和N:P。（3）冗余分析表明，土壤含水量（SWC）、土壤有机碳含量（SOC）和空气干燥度（AD）是影响两种荒漠植物叶功能性状变化的主要限制环境因子。

关键词： 阻沙固沙带；典型荒漠植物；叶功能性状；环境因子；河西走廊

植物功能性状是植物在长期适应环境的过程中，自身内部功能间协调、进化与平衡的产物[1]。叶功能性状作为植物功能性状的重要组成部分，对外界环境具有高度敏感性，可直观反映出植物对环境的适应策略[2]。当环境发生变化时，为维持内环境的相对稳定，植物功能性状会自发进行调节，以适应复杂多变的环境[3]，而叶片作为植物与环境进行物质与能量交换的基本单元，其形态参数、养分含量等特征会最先对生境中的光、热、水、养等生活因子的变化做出相应调整[4-6]。

目前，国内外针对荒漠植物叶功能性状对环境因子变化的响应机制做了大量研究。例如，王飞等[7]研究发现造成甘肃民勤荒漠植物沙拐枣叶功能性状变异的主要土壤因子是氮、pH和土壤含水量；李瑞等[8]研究了不同降水条件下红砂、盐爪爪等荒漠植物叶片形态性状的应对策略，其中盐爪爪通过减小比叶面积、增加叶组织密度，红砂通过增加叶片的肉质化程度和含水量等来适应干旱少雨的荒漠环境，认为年均降水量和海拔是影响植物生长发育的主要限制环境因子；李静等[9]认为在河西走廊研究区土壤含水量会丰富草本层。可见水分是影响干旱区荒漠植物叶功能性状的主要环境因子，且不同植物应对这一环境变化的策略会有差异。然而，叶功能性状是各环境因子综合作用的产物。对荒漠生态系统而言，叶功能性状不仅是对土壤干旱的适应，也是对大气相对湿度、风沙等环境因子适应的结果。

河西走廊是地处甘肃省西北部的一个长约1000 km的狭长地带，降水稀少且由东南向西北呈明显的递减趋势[10]，独特的气候类型与生境造就了河西走廊荒漠植物特有的分布规律和生存策略[11]，且在叶功能性状上差异显著[7-9]。近几十年来，我国北方地区气候有明显的干暖化趋势，地表湿润指数和土壤湿度明显减小[12]，这势必会影响北方荒漠区植物的生存和分布。为适应这一变化，植物功能性状也将随之改变。绿洲是河西走廊荒漠背景基质上发育的人工生态系统，阻沙固沙带是绿洲前沿最关键的生态屏障，是由防护林带、封育等措施组合

收稿日期： 2024-06-03； **修订日期：** 2024-11-05
基金项目： 国家自然科学基金区域创新发展联合资助项目（U21A2001）
作者简介： 柴巧弟（1997-），女，硕士研究生，主要从事荒漠生态方向的研究. E-mail: chaiqd@st.gsau.edu.cn
通讯作者： 马瑞. E-mail: mr031103@126.com

而成的防风固沙体系。作为荒漠和绿洲生态系统之间极为重要的生态缓冲区,阻沙固沙带具有明显的风沙输移和生态因子边缘效应。梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和白刺(*Nitraria tangutorum*)分别是阻沙固沙带最具代表性的人工造林树种和天然植物种,其叶功能性状必然对所处的环境作出响应。本研究以河西走廊东部民勤县和中部高台县的阻沙固沙带为研究区,通过对梭梭和白刺叶功能性状主要参数特征及与环境因子相关性的研究,旨在为评价阻沙固沙带边缘效应提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区分别位于武威市民勤县和张掖市高台县。所用气象数据来源于2018—2022年的国家气象站和区域气象站观测资料。民勤县地处石羊河下游,延伸于巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠之间,高台县地处黑河中游,紧靠巴丹吉林沙漠南缘,年平均降水量分别为113.2 mm、131.5 mm,蒸发量分别为2597.9 mm、2003 mm,干燥度分别为22.95、15.23,气温分别为7.7 ℃、6.2 ℃,风速分别为2.5 $m\cdot s^{-1}$、2.8 $m\cdot s^{-1}$。依据《中国气候区划名称与代码气候带和气候大区》(GB/T 17297—1998),民勤县和高台县分别属于极干旱气候和干旱气候。

1.2 样地选择

2023年8月中旬,通过查阅相关资料和实地调查,分别在民勤和高台选取由上风向的自然植被封育保护带和下风向的乔灌防护林带,空间结构特征较为一致的阻沙固沙带作为研究样地。在自然植被封育保护带设置3个10 m×10 m的白刺样方,在梭梭林距上风向林缘约50 m处设置3个10 m×10 m的梭梭样方,对样方内白刺和梭梭特征进行调查。梭梭和白刺样地特征见表1。

1.3 植物叶片和土壤样品采集

为了减少水分支出,梭梭叶片退化为同化枝,旨在减少水分散失,避免日光灼伤,以提高其在干旱环境中的生存能力。为方便表述,本研究所称梭梭叶片即指梭梭的同化枝。在各样方内选取长势良好的梭梭和白刺植株,用修枝剪在植株东、南、西、北4个方位剪取带叶的小枝后,混合后迅速装入提前做好标记的自封袋,在恒温箱内低温保存,带回实验室处理。

在每个样方采用东、西、南、北、中5点法采集土壤样品。采集时,清除表层枯落物,挖取土壤剖面,用取土铲均匀采集0~40 cm的土样,将5个点的土壤样品混合后装入自封袋进行密封,带回实验室测定土壤理化性质。

1.4 指标测定

1.4.1 叶功能性状指标测定 将带回实验室的植物样品,叶鲜重采用精度为0.001的电子分析天平称重,随后将叶片在黑暗环境中完全浸没于去离子水中直至完全饱和,控水后测定叶饱和鲜重,之后将叶片放入烘箱中105°杀青30 min,降低烘箱温度至65°,烘至恒重,称其叶干重。叶厚度(Leaf Thickness,LT,mm)采用精度为0.02 mm的游标卡尺测定。叶面积(Leaf Area,LA,cm^2)先借助扫描仪对叶片进行图像化,之后用Image J软件对图像进行处理,获得叶面积值。采用重铬酸钾氧化-外加热法测定叶有机碳含量(Leaf Organic Carbon,LOC,$mg\cdot g^{-1}$);采用半微量-凯氏法测定叶氮含量(Leaf Nitrogen,LN,$mg\cdot g^{-1}$);采用碳酸氢钠-钼锑抗比色法测定叶磷含量(Leaf Phosphorus, LP, $mg\cdot g^{-1}$)。植物的叶片LWC、LDMC、SLA分别用下式计算:

$$叶片含水量(LWC)/\% = \frac{叶鲜重/g - 叶干重/g}{叶鲜重/g} \times 100\% \quad (1)$$

表1 样地特征

Tab. 1 Characteristics of sampling site

研究区	地理位置	海拔/m	物种	林龄/a	株高/cm	冠幅/cm		枯梢率/%	病虫害	生境描述
						长轴	短轴			
民勤	38°91′N,103°91′E	1332	梭梭	10~15	167.86±3.06	164.08±9.45	159.88±7.60	15~20	无	土壤类型为沙土,土壤含水量约为0.1%~0.2%
			白刺		90.65±5.57	135.95±6.38	124.42±8.06	无	无	
高台	39°53′N,99°53′E	1228	梭梭	10~15	228.45±7.31	272.10±2.74	213.71±7.47	仅见于风蚀槽内	无	土壤类型为沙土,土壤含水量约为0.2%~0.7%
			白刺		145.82±13.23	480.57±10.44	394.82±8.60	无	无	

注:表中数值为平均值±标准差。

$$叶干物质含量(LDMC)/\% = \frac{叶鲜重/g}{叶饱和鲜重/g} \times 100\% \quad (2)$$

$$比叶面积(SLA)/(cm^2 \cdot g^{-1}) = \frac{叶面积/cm^2}{叶干重/g} \times 1000 \quad (3)$$

1.4.2 土壤理化性质测定 参考《土壤农化分析》测定各指标[13],采用烘干称重法测定土壤含水量(Soil Water Content,SWC,%);采用重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机碳含量(Soil Organic Carbon,SOC,$mg \cdot g^{-1}$);采用半微量-凯氏法测定土壤氮含量(Soil Nitrogen,SN,$mg \cdot g^{-1}$);采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定土壤磷含量(Soil Phosphorus,SP,$mg \cdot g^{-1}$);采用电导法测定电导率(Electrical Conductivity,EC,$\mu S \cdot cm^{-1}$);采用电位计法测定pH值。

1.5 数据处理与分析

用Microsoft Excel 2021和SPSS 23.0对试验数据进行处理和统计分析。通过方差分析对两种生境下植物叶功能性状和环境因子进行差异比较;用主成分分析法对植物叶功能性状进行排序后获得主要指标因子;用Pearson法分析植物叶功能性状各指标相关性;对两种生境条件下植物叶功能性状与环境因子之间的关系采用冗余排序分析(RDA)。利用OriginPro 2024和Canoco 4.5完成绘图。

2 结果与分析

2.1 两种生境下叶功能性状特征

双因素方差分析表2表明,梭梭和白刺LDMC、LWC、SLA在两种生境下具有显著差异($P<0.05$)。由图1可知,在民勤,梭梭和白刺LDMC分别为0.15%、0.21%,略高于高台0.13%、0.18%,LWC、SLA明显低于高台。由此可知,在降水少且蒸发强烈的环境条件下,对植物叶功能性状的影响很大,造成这种现象可能是气候干湿程度和土壤因子等共同作用的结果。

由表2可知,LOC含量、C:N、LN含量、LP含量、N:P和C:P在两种生境下均具有极显著差异($P<0.001$)。由图2所示,民勤梭梭和白刺LOC含量、C:N和C:P低于高台。但在民勤,梭梭和白刺LN含量、LP含量和N:P均分别高于高台。这说明梭梭和白刺的叶化学性状在两种生境下表现出了明显的差异,可能在不同干旱气候和土壤水分匮乏等环境条件下,植物生长速率不同,从而使植物叶片所含化学元素存在差异。

2.2 叶功能性状间相关性及主成分分析

由表3可知,在民勤,两种植物LT与LDMC呈显著正相关($P<0.05$),LT与SLA呈极显著负相关($P<0.01$)。植物SLA与LOC含量、C:N均呈极显著负相关($P<0.01$)。与N:P、C:P呈显著正相关($P<0.05$)。LOC含量与C:N呈极显著负相关($P<0.01$)。在高台,植物LT与SLA、LP含量、C:N呈极显著负相关($P<0.01$),LDMC与SLA、LN含量、C:N呈显著正相关($P<0.05$),与LP含量呈极显著负相关($P<0.01$),LOC含量与LP含量呈极显著负相关($P<0.01$),与C:N呈显著正相关($P<0.05$)。

如表4所示,通过主成分分析得出其随生境变

表2 两种生境下植物叶功能性状的差异性

Tab. 2 Differences of leaf functional traits in two habitats

叶功能性状	生境		物种		生境×物种	
	F	P	F	P	F	P
LT	2.939	0.089	51.456	0.001***	46.56	0.001***
LWC	9.787	0.002*	345.204	0.001***	138.238	0.001***
LDMC	41.070	0.001***	148.046	0.001***	1.316	0.254
SLA	35.768	0.001***	140.807	0.001***	4.185	0.043*
LOC	55.635	0.001***	1201.515	0.001***	74.988	0.001***
LN	79.531	0.001***	1.475	0.001***	57.188	0.001**v
LP	45.049	0.001***	5.312	0.001***	118.909	0.001***
C:N	809.438	0.001***	0.280	0.598	0.042	0.838
N:P	238.968	0.001***	103.876	0.001***	59.729	0.001***
C:P	373.174	0.001***	163.228	0.001***	82.388	0.254

注:*表示$P<0.05$,**表示$P<0.01$,***表示$P<0.001$;生境类型为民勤和高台阻沙固沙带,物种为梭梭和白刺;LT为叶厚度,LWC为叶片含水量,LDMC为叶干物质含量,SLA为比叶面积,LOC为叶有机碳含量,LN为叶氮含量,LP为叶磷含量。下同。

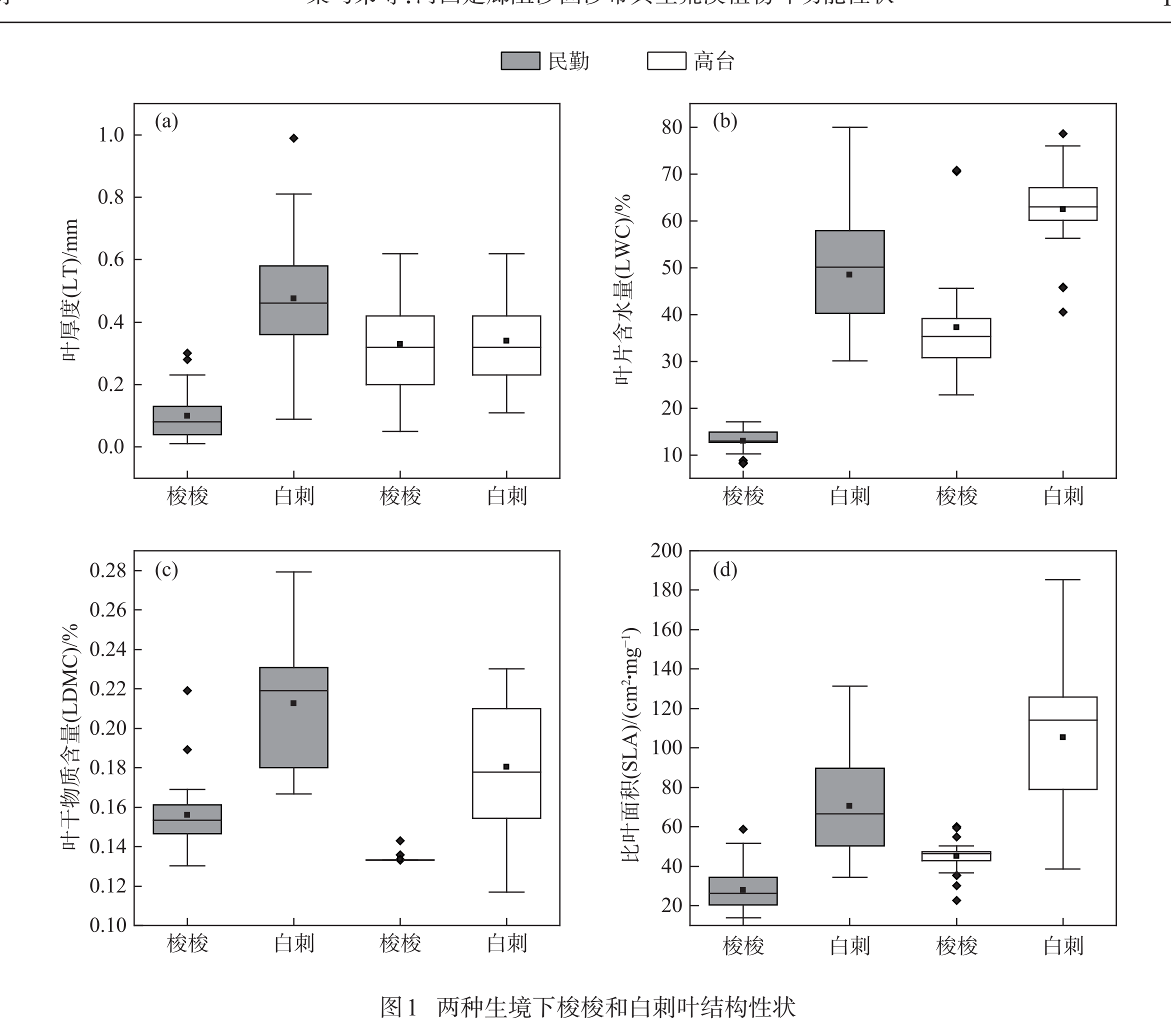


图1　两种生境下梭梭和白刺叶结构性状

Fig. 1　Leaf structural traits *H. ammodendron* and *N. tangutorum* in two habitats

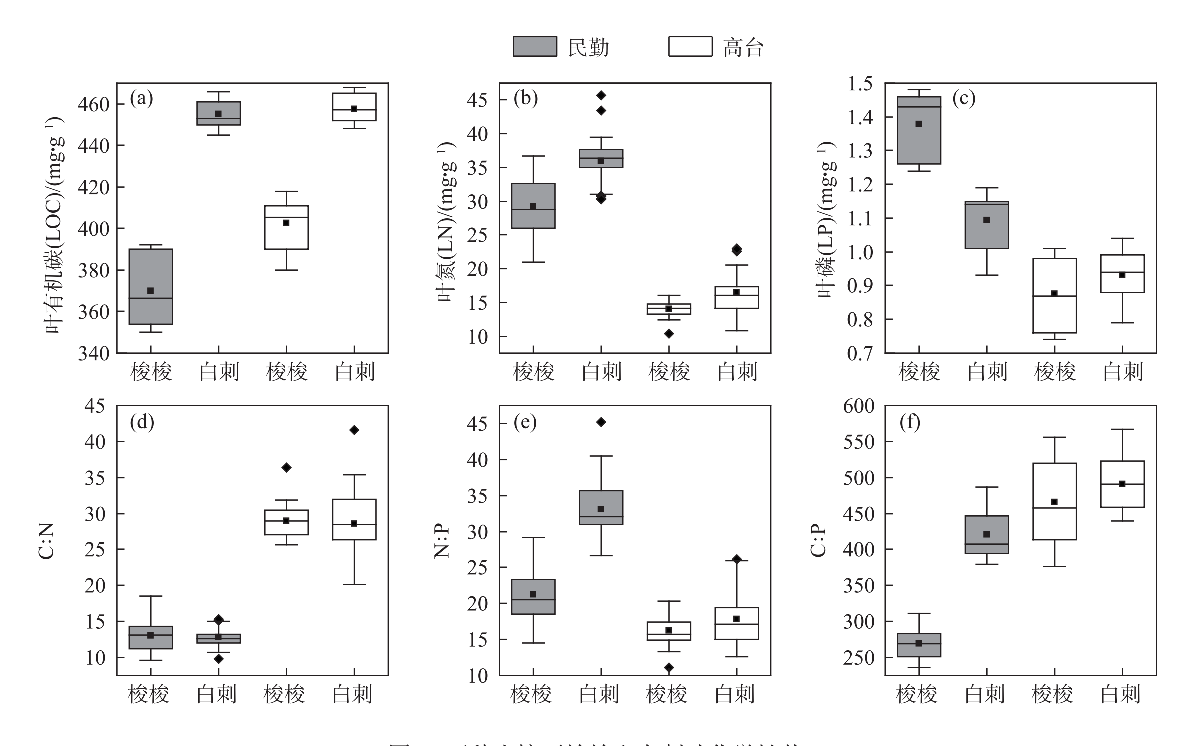


图2　两种生境下梭梭和白刺叶化学性状

Fig. 2　Leaf chemical traits *H. ammodendron* and *N. tangutorum* in two habitats

表3 叶功能性状指标之间的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients between leaf functional trait indexes

样地	指标因子	LT	LWC	LDMC	SLA	LOC	LN	LP	C:N	N:P	C:P
民勤	LT	1									
	LWC	0.031	1								
	LDMC	0.046*	0.732	1							
	SLA	−0.093**	0.686	0.427	1						
	LOC	0.064	0.919	0.696	−0.699**	1					
	LN	−0.009	0.447	0.477	0.389	0.529	1				
	LP	0.017	0.295	0.213	0.253	0.317	0.089	1			
	C:N	0.003	−0.033	−0.150	−0.058**	−0.100**	0.871	0.030	1		
	N:P	−0.037	0.243	0.306	0.215*	0.306	0.858	0.431	0.809	1	
	C:P	0.013	0.274	0.215	0.183*	0.306	0.230	0.804	0.078	0.615	1
高台	LT	1									
	LWC	0.423	1								
	LDMC	0.720	0.427	1							
	SLA	−0.517**	0.242	0.499*	1						
	LOC	0.767	0.417	0.728	0.726	1					
	LN	0.618	0.444	0.448**	0.400	0.599	1				
	LP	−0.729**	−0.511	−0.706**	−0.646	−0.815**	−0.569	1			
	C:N	−0.149**	−0.209	0.014*	0.081	0.034*	−0.765	0.051	1		
	N:P	0.758	0.533	0.641	0.567	0.781	0.899	−0.859	−0.486	1	
	C:P	0.780	0.481	0.755	0.715	0.934	0.602	−0.958	−0.012	0.868	1

表4 初始因子旋转成分矩阵与主成分贡献率

Tab. 4 Initial factor rotation component matrix and principal component contribution rate

样地	指标因子	主成分一	主成分二	主成分三	主成分四	综合得分	综合位次	公因子方差
民勤	LT	−1.178	0.254	−1.847	−0.311	−0.818	9	0.974
	LWC	−0.995	−0.354	−1.424	1.341	−0.642	8	0.920
	LDMC	−0.924	−0.124	0.587	2.027	−0.023	5	0.656
	SLA	−0.885	−0.427	−1.228	1.210	−0.593	7	0.671
	LOC	−1.205	0.223	−0.913	1.203	−0.457	6	0.921
	LN	−0.930	−0.535	0.160	0.278	1.234	2	0.991
	LP	−1.059	−0.380	1.373	0.134	0.028	4	0.989
	C:N	−0.818	−0.361	0.100	0.583	0.412	3	0.983
	N:P	−1.153	−0.032	1.193	0.903	−1.007	10	0.995
	C:P	−1.124	−0.178	−0.161	0.225	1.508	1	0.991
	特征值	4.084	2.410	1.567	1.028			
	贡献率/%	34.266	26.070	20.263	10.295			
	累计贡献率/%	34.266	60.336	80.600	90.895			
高台	LT	−1.092	0.469	−1.748	0.267	−0.626	8	0.834
	LWC	−1.161	−0.146	0.242	−0.614	−0.483	5	0.987
	LDMC	−0.299	−0.693	−0.120	−0.607	−0.392	4	0.847
	SLA	−1.061	−0.114	−0.835	0.069	−0.572	6	0.904
	LOC	−1.002	−0.127	−0.794	−0.409	−0.624	7	0.900
	LN	−0.237	−0.151	−2.777	−0.009	−0.742	10	0.980
	LP	−0.697	−0.502	1.386	−0.919	−0.193	3	0.870
	C:N	−0.956	−0.512	1.668	−0.310	−0.146	2	0.981
	N:P	−0.844	−0.723	1.587	0.350	−0.091	1	0.971
	C:P	−0.380	−1.338	−0.287	−0.800	−0.650	9	0.961
	特征值	6.297	1.683	0.742	0.512			
	贡献率/%	34.943	23.751	21.512	12.134			
	累计贡献率/%	34.943	58.694	80.206	92.339			

化的主要指标，影响民勤梭梭和白刺叶功能性状前4个主成分的特征值分别为4.084、2.410、1.567和1.028，贡献率分别为34.266%、26.070%、20.263%和10.295%，累计贡献率为90.859%；影响高台梭梭和白刺叶功能性状的前4个主成分的特征值分别为6.297、1.683、0.742和0.512，贡献率分别为34.943%、23.751%、21.512%和12.134%，累计贡献率为92.339%。两种生境的累计贡献率均大于85%，说明民勤与高台各自4个主成分因素是代表梭梭和白刺叶功能性状变化的主要因素。

由上可知，影响民勤梭梭和白刺叶功能性状前3个指标因子为LN含量、C:N和C:P；影响高台梭梭和白刺叶功能性状前3个指标因子为LP含量、C:N和N:P，其中C:N是两种生境下两种植物叶功能性状中综合排名前3的共同指标因子。

2.3 两种生境下土壤因子

由图3可知，土壤因子SN和SP含量在民勤和高台两种生境下存在差异，其取值范围分别是0.0532~0.0026 mg·g^{-1}和0.553~0.443 mg·g^{-1}；民勤EC低于高台，民勤pH略高于高台；两种生境下土壤都呈碱性。民勤SOC含量低于高台。而土壤SWC等在两种生境下具有显著差异（$P<0.05$），其中民勤试验区土壤SWC约为0.1%~0.2%，高台约为0.2%~0.7%，这是由于高台林业用水供给量大于民勤，地下水位整体高于民勤，故其绿洲外围人工林及自然植被长势相对良好，其高度、冠幅、土壤水分状况明显优于民勤绿洲外围。

2.4 叶功能性状与环境因子的关系

如图4所示，两种荒漠植物叶功能性状特征在第一轴、第二轴、第三轴、第四轴的解释量分别为79.46%、0.75%、0.38%、0.30%，而前两轴累积贡献值为80.21%，则前两轴较好地反映了植物叶功能性状与环境因子的相关性，且相关性主要由RDA第一轴决定。土壤SWC与植物LWC、LDMC、SLA、LOC含量、LN含量、LP含量、N:P和C:P呈正相关关系；与植物LT和C:N呈负相关关系，其中土壤SWC、pH和SOC含量与植物SLA的正相关性最大。空气干燥度AD与植物LT、LWC、LDMC、SLA、LOC含量、LN含量、LP含量呈负相关关系。与土壤SN含量、SP含量、EC、C:N呈正相关关系。

3 讨论

3.1 两种生境下梭梭、白刺叶功能性状的差异性

叶功能性状是植物长期对环境因子及其变化的适应策略。在干旱荒漠区，水分是影响植物分布

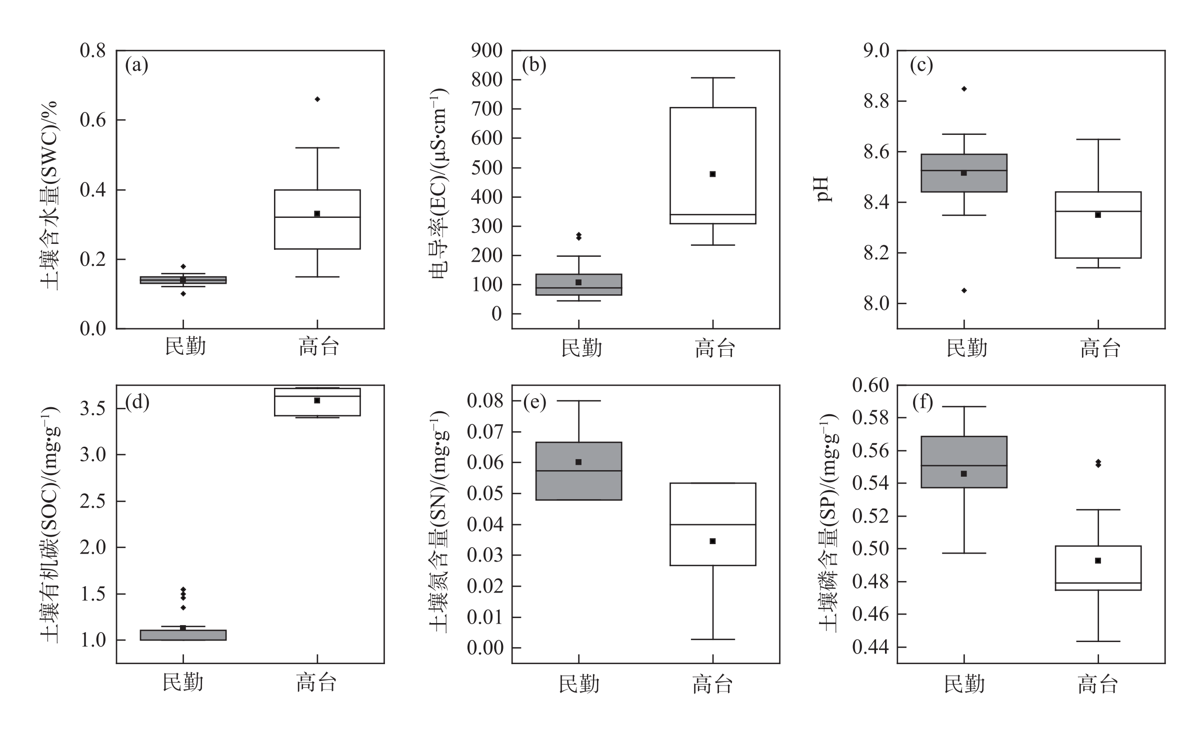
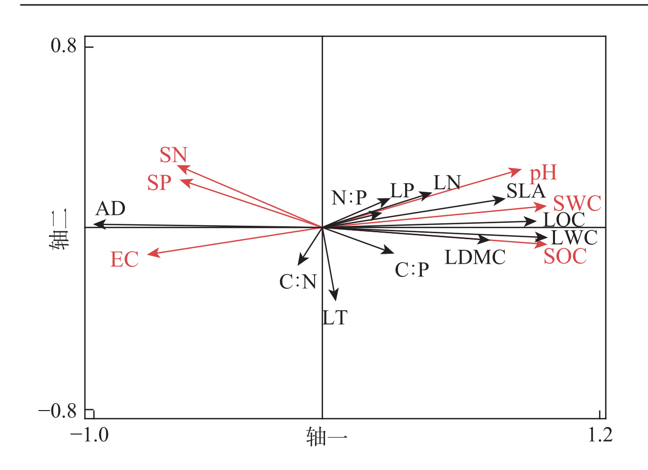


图3　河西走廊阻沙固沙带两种生境下土壤因子差异

Fig. 3　Differences in soil factors in two habitats in the sand-blocking and sand-fixing belt of Hexi Corridor



注:SWC为土壤含水量,EC为电导率,pH为酸碱度,SOC为土壤有机碳含量,SN为土壤氮含量,SP为土壤磷含量,AD为空气干燥度,LT为叶厚度,LWC为叶片含水量,LDMC为叶干物质含量,SLA为比叶面积,LOC为叶有机碳含量,LN为叶氮含量,LP为叶磷含量。

图4 河西走廊阻沙固沙带植物叶功能性状与环境因子的RDA排序图

Fig. 4 RDA ranking diagram of leaf functional traits and environmental factors in the sand-blocking and sand-fixing belt of Hexi Corridor

及生长发育的环境主导因子,而包括叶片含水量在内的叶功能性状不仅受限于土壤水分,还受到环境温度、湿度、光照强度、风速等多个因素的影响。本研究中,依据降水量,高台和民勤均位于干旱区,但民勤蒸发量远高于高台,由干燥度指数可知,高台属于干旱气候,民勤属于极干旱气候。气候干湿程度的不同,必将对叶片蒸腾速率和叶片含水量产生影响,继而影响到叶片内以水分为媒介的生命活动并集中体现在叶片的厚度、干物质含量、比叶面积、养分含量等性状上。已有研究表明,在干旱区生长的植物,叶片较厚,叶干物质含量减小,比叶面积减小等表现[14]。

本研究发现,在土壤含水量低和空气干燥度等因素的影响下,民勤梭梭的LT和LWC明显低于高台。然而,与梭梭不同,民勤白刺的LT相较于高台略大,但LWC比高台小。在民勤,尽管白刺的叶片大、宽、厚,但水分明显不足,而在高台,白刺叶片小、窄、薄,但水分饱满。梭梭和白刺植物LDMC、SLA在两种生境下具有显著差异(P<0.05);梭梭和白刺植物LOC含量、LN含量、LP含量、C:N、N:P、C:P在两种生境下均具有极显著差异(P<0.001)。这说明梭梭和白刺在民勤较为干旱贫瘠的环境条件下,首先会降低叶片含水量和光合作用来减缓植物体内有机碳LOC含量的合成,其次是为抵御干旱和高温,采取减少自身SLA降低生长速率。本研究中,经单因素方差分析,分布在高台的植物LOC含量显著高于民勤(P<0.05),而植物LN和LP含量显著低于民勤(P<0.05),说明生长在高台的梭梭和白刺从土壤中获取LOC含量的能力比生长在民勤的梭梭和白刺要好,这可能是由于民勤干旱荒漠生境条件下土壤水盐胁迫会抑制植物生长和光合,从而降低植物叶片的固碳能力[15]。梭梭和白刺LN和LP含量随土壤含水量和空气干燥度的增加而呈现上升趋势,说明随着民勤土壤含水量的减少和空气干燥度的增加,植物为抵御严酷的环境,叶片中储存的LN和LP含量升高[16]。有研究表明,当植物叶片N:P大于16时,主要受磷元素影响[17]。植物N:P体现了对环境营养成分的吸收状况。其中,本研究中两种生境下梭梭和白刺N:P平均值(16.17,17.79)均大于16,表明了这两种植物的生长可能主要受磷元素影响的因素较大。

3.2 两种生境下梭梭、白刺叶功能性状间相关性

自然环境条件下,植物在长期的进化过程除了通过各功能性状间的协同与权衡,也需要具备适应环境的异质性[18]。因此,植物叶功能性状间关系密切,各性状间组合调整以适应不同生境[19]。植物SLA会直接影响叶片构建保卫组织或叶肉密度来提高利用土壤水分效率,LT与植物对水分保存、获取资源和同化密切相关。本试验两种生境条件下,梭梭和白刺SLA和LT呈负相关关系(P<0.05),与植物LDMC呈正相关关系(P<0.05),这与前人Ohashi等的研究结果一致[20]。两种植物叶功能性状相关性分析表明,SLA均与LDMC呈显著正相关(P<0.05),这主要原因是两个试验区都属于干旱荒漠区,而荒漠植物为维持体内水分含量,由SLA和LDMC的共同作用来平衡[19]。叶有机碳、叶氮、叶磷作为构成植物体最主要的元素,在植物各项生理活动中起着重要作用[21]。经单因素方差分析民勤植物LOC含量显著低于高台(P<0.05),这可能是民勤生态环境比高台县较为恶劣,蒸发强烈,干燥度指数较高,民勤属极干旱气候,高台属干旱气候,导致植物在生长过程中受到水分制约,减缓了植物生长速率,从而抑制植物体内LOC含量的合成。C:N和C:P反映了植物对C含量的同化能力以及对N、P含量利用效率,N:P则反映了植物生长受N或P含量的限制情况[22],

其在生物地球化学循环中与植物-土壤系统养分循环中起着举足轻重的作用[23]。本试验中，两种生境下植物LOC与LN含量呈极显著正相关($P<0.01$)。此外，民勤植物N:P、C:P与LOC含量呈极显著正相关($P<0.001$)，高台植物N:P、C:P与植物LOC含量显著正相关($P<0.01$)；这与聂明鹤等[24]对不同优势植物研究结果一致，说明植物养分对植物形态结构构件起着主导作用。综上，本研究中C:P是两种生境下梭梭和白刺叶功能性状中综合排名前三的共同指标因子，可以作为两种植物相对最为重要的叶功能性状。因此C:P是判断试验区植物营养状况的关键指标，影响荒漠植物群落结构与性质的重要性状[25]。两个试验区均属于干旱荒漠区，降雨量少，且蒸发强烈，植物需要通过调节体内养分以抵御严酷的自然环境。

3.3 两种生境下梭梭、白刺叶功能性状对环境因子的响应

植物与土壤之间是相互联系的有机整体，土壤为植物体内循环提供化学元素，植物又通过枯枝落叶物等的分解返还给土壤养分[26]，土壤在植物生长过程中提供了所需重要能量来源和物质来源，是影响植物叶功能性状的主导因素[27]。本试验中，土壤C:N与植物LOC含量、LN含量、LP含量、SLA、LWC、LDMC呈显著正相关($P<0.05$)，与植物LT呈显著负相关($P<0.05$)。冗余分析表明，叶功能性状受土壤SWC、SOC含量、pH、C:N、N:P的影响相对较大。这主要原因是在干旱地区，荒漠植物生长不仅受水分短缺限制，还受土壤养分制约[28]。

土壤水分不仅对植物生长繁衍演替有关，还对土壤养分的分布产生影响[29]。由于干旱荒漠研究区蒸发强烈和降雨少，导致土壤水分容易流失[30]。另外，土壤水分、养分含量下降，进一步抑制荒漠植物养分吸收和生长发育等[27,31]。民勤和高台蒸发量均显著高于降水量，但高台土壤含水量可以得到林业供水的良好补充，水分充足，植物生境略优于民勤。由干燥度指数可知，民勤属于极干旱气候，高台属于干旱气候。在自然环境中，植物叶功能性状随土壤含水量等的变化而变化[32]，还可能与空气干燥度等环境因子有关，表现了植物对环境因子的综合作用适应性结果。由RDA排序轴显示，随着空气干燥度的增加和土壤SWC减少生境逐渐恶化，植物LOC含量下降。高台植物LOC含量显著高于民勤，且均表现为越靠近沙漠远离绿洲植物LOC含量下降越明显，这可能是由于极端干旱生境条件下土壤水分短缺，从而抑制植物生长，导致植物叶片的固碳能力降低[15]，这与罗艳[33]、张晓龙等[34]对荒漠区植物叶化学性状的研究结果相同，揭示了土壤水分因素会调节荒漠区植物养分的循环与转化。本试验中空气干燥度与植物LWC、LDMC、SLA、LOC含量、LN含量和LP含量等均呈显著正相关($P<0.05$)，揭示出空气干燥度与植物叶片营养元素之间关系紧密。因此，荒漠植物除了通过改变叶片结构来适应土壤水分和气候干旱的环境条件之外，还可能通过增加LDMC、降低植物LA和SLA来应对日益干旱贫瘠的环境。此外，植物叶功能性状对环境的适应是一个复杂的过程，往往做出调整与改变为适应环境变化，从而提高对干旱贫瘠环境的适应能力。研究结果进一步揭示了土壤因子和气候干湿程度在梭梭和白刺生长发育中的影响机制，将为评价阻沙固沙带边缘效应提供参考依据。

4 结 论

本研究以两种生境条件下典型荒漠植物梭梭和白刺为研究对象，分析叶功能性状特征与环境因子的关系。研究得出，民勤县的个体具有较高的叶干物质(LDMC)、叶氮(LN)和叶磷含量(LP)，高台县的个体具有较高的比叶面积(SLA)和叶有机碳含量(LOC)。在荒漠地区，土壤含水量(SWC)、土壤有机碳含量(SOC)和空气干燥度(AD)对荒漠植物叶功能性状变化起到了较好的解释。

参考文献(References)：

[1] Violle C, Navas M L, Vile D, et al. Let the concept of trait be functional![J]. Oikos, 2007, 116(5): 882-892.

[2] Wright I J, Reich P B, Westoby M, et al. The worldwide leaf economics spectrum[J]. Nature, 2004, 428(6985): 821-827.

[3] 李玉霖, 崔建垣, 苏永中. 不同沙丘生境主要植物比叶面积和叶干物质含量的比较[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 304-311. [Li Yulin, Cui Jianyuan, Su Yongzhong. Comparison of specific leaf area and leaf dry matter content of main plants in different dune habitats[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(2): 304-311.]

[4] 焦德志, 钟露朋, 杨建霄, 等. 扎龙湿地不同生境芦苇功能性状变异及其对土壤因子的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(22): 9305-9313. [Jiao Dezhi, Zhong Lupeng, Yang Jianxiao, et al. Variation of functional traits of *Phragmites australis* and its response to soil factors in different habitats of Zhalong Wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9305-9313.]

[5] 孙力, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地北缘荒漠典型植物叶片化学计量特征及其与土壤环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1208-1214. [Sun Li, Gong Lu, Zhu Meiling, et al. Leaf stoi-

chiometry of typical desert plants in the northern margin of Tarim Basin and its relationship with soil environmental factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(5): 1208–1214.]

[6] 李从娟, 徐新文, 孙永强, 等. 不同生境下三种荒漠植物叶片及土壤C、N、P的化学计量特征[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 996–1004. [Li Congjuan, Xu Xinwen, Sun Yongqiang, et al. Stoichiometric characteristics of C, N and P in leaves and soil of three desert plants in different habitats[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(5): 996–1004.]

[7] 王飞, 陈文业, 郭树江, 等. 沙拐枣叶功能性状对生境变化的响应[J]. 西北植物学报, 2024, 44(1): 77–87. [Wang Fei, Chen Wenye, Guo Shujiang, et al. Responses of leaf functional traits to habitat changes in *Calligonum mongolicum*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(1): 77–87.]

[8] 李瑞, 单立山, 解婷婷, 等. 典型荒漠灌木叶片功能性状特征随降水梯度的变化研究[J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 425–435. [Li Rui, Shan Lishan, Jie Tingting, et al. Study on the variation of leaf functional traits of typical desert shrubs with precipitation gradient[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(3): 425–435.]

[9] 李静, 陈斌, 田晓萍, 等. 河西走廊中段草原植物群落物种多样性与土壤含水量的关系[J/OL]. 草原与草坪, [2024-09-04], 1–11. [Li Jing, Chen Bin, Tian Xiaoping, et al. Relationship between species diversity and soil water content of grassland plant communities in the middle section of Hexi Corridor[J/OL]. Grassland and Turf, [2024-09-04], 1-11.]

[10] 李天江, 奚立宗, 李玲萍, 等. 基于CMPAS产品的河西走廊汛期降水日变化特征[J]. 陕西气象, 2024(4): 26–31. [Li Tianjiang, Xi Lizong, Li Lingping, et al. Diurnal variation characteristics of precipitation in flood season in Hexi Corridor based on CMPAS products[J]. Shanxi Meteorology, 2024(4): 26–31.]

[11] Zhang Y, Xie J B, Li Y. Effects of increasing root carbon investment on the mortality and resprouting of *Haloxylon ammodendron* seedlings under drought[J]. Plant Biology, 2017, 19(2): 191–200.

[12] 史培军, 严平, 高尚玉, 等. 我国沙尘暴灾害及其研究进展与展望[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(3): 71–77. [Shi Peijun, Yan Ping, Gao Shangyu, et al. Sandstorm disaster in China and its research progress and prospect[J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(3): 71–77.]

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30–204. [Bao Shidan. Soil Agrochemical Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30–204.]

[14] Cunningham S A, Summerhayes B, Westoby M. Evolutionary divergences in leaf structure and chemistry, comparing rainfall and soil nutrient gradients[J]. Ecological Monographs, 1999, 69(4): 569–588.

[15] Dodd G L, Donovan L A. Water potential and ionic effects on germination and seedling growth of two cold desert shrubs[J]. American Journal of Botany, 1999, 86(8): 1146–1153.

[16] 苏培玺, 严巧娣. 内陆黑河流域植物稳定碳同位素变化及其指示意义[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1616–1624. [Su Peixi, Yan Qiaodi. Stable carbon isotope variation of plants in inland Heihe River Basin and its indicative significance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1616–1624.]

[17] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤C、N、P化学计量特征[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6581–6590. [Liu Wande, Su Jianrong, Li Shuaifeng, et al. Stoichiometric characteristics of C, N and P in plant and soil of monsoon evergreen broad-leaved forest succession series in Pu'er, Yunnan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6581–6590.]

[18] 何念鹏, 刘聪聪, 张佳慧, 等. 植物性状研究的机遇与挑战: 从器官到群落[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6787–6796. [He Nianpeng, Liu Congcong, Zhang Jiahui, et al. Opportunities and challenges in plant trait research: From organ to community[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): 6787–6796.]

[19] 余华, 钟全林, 黄云波, 等. 不同种源刨花楠林下幼苗叶功能性状与地理环境的关系[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 449–458. [Yu Hua, Zhong Quanlin, Huang Yunbo, et al. The relationship between leaf functional traits and geographical environment of seedlings under different provenances of *Machilus pauhoi*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2): 449–458.]

[20] Ohashi Y, Nakayama N, Saneoka H, et al. Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants[J]. Biologia Plantarum, 2006, 50: 138–141.

[21] Qin H, Jiao L, Zhou Y, et al. Elevation affects the ecological stoichiometry of Qinghai spruce in the Qilian Mountains of Northwest China[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 917755.

[22] Klausmeier C A, Litchman E, Daufresne T, et al. Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton[J]. Nature, 2004, 429(6988): 171–174.

[23] Wang L, Zhao G, Li M, et al. C: N: P stoichiometry and leaf traits of halophytes in an arid saline environment, Northwest China[J]. PLoS One, 2015, 10(3): e0119935.

[24] 聂明鹤, 沈艳, 陆颖, 等. 宁夏盐池县荒漠草原区不同群落优势植物叶片-土壤生态化学计量特征[J]. 草地学报, 2021, 29(1): 131–140. [Nie Minghe, Shen Yan, Lu Ying, et al. Leaf-soil ecological stoichiometric characteristics of dominant plants in different communities of desert steppe in Yanchi County, Ningxia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(1): 131–140.]

[25] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996: 1441–1450.

[26] 王鹏, 戴亚, 吕祥敏, 等. 用流动分析仪测定烟田土壤中的全氮、全磷[J]. 烟草科技, 2004(12): 28–29, 35. [Wang Peng, Dai Ya, Lv Xiangmin, et al. Determination of total nitrogen and total phosphorus in tobacco field soil by flow analyzer[J]. Tobacco Science & Technology, 2004(12): 28–29, 35.]

[27] 张旋, 李蕊希, 郑洲, 等. 极端干旱区多枝柽柳叶片功能性状及其与土壤理化因子的关系[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3699–3708. [Zhang Xuan, Li Ruixi, Zheng Zhou, et al. Leaf functional traits of T*amarix ramosissima* and their relationship with soil physical and chemical factors in extreme arid area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3699–3708.]

[28] Zhang B, Tang G, Yin H, et al. Groundwater depths affect phosphorus and potassium resorption but not their utilization in a desert phreatophyte in its hyper-arid environment[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 665168.

[29] 李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(11): 2105−2138. [Li Zhongkai, Li Xiaoyan, Zhou Sha, et al. Research progress on soil-vegetation-hydrology coupling process and mechanism[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022, 52(11): 2105−2138.]

[30] Zhou H, Chen Y, Li W, et al. Photosynthesis of *Populus euphratica* and its response to elevated CO_2 concentration in an arid environment[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(4): 443−451.

[31] 刘深思, 徐贵青, 米晓军, 等. 地下水埋深和季节性干旱对古尔班通古特沙漠南缘梭梭生理和生长的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8881−8891. [Liu Shensi, Xu Guiqing, Mi Xiaojun, et al. Effects of groundwater depth and seasonal drought on the physiology and growth of *Haloxylon ammodendron* in the southern margin of the Gurbantunggut Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(21): 8881−8891.]

[32] 王鑫, 杨磊, 赵倩, 等. 半干旱黄土小流域草地群落功能性状空间异质性及环境驱动[J]. 草业科学, 2019, 36(9): 2201−2211. [Wang Xin, Yang Lei, Zhao Qian, et al. Spatial heterogeneity and environmental driving of grassland community functional traits in semi-arid loess small watershed[J]. Grassland Science, 2019, 36 (9): 2201−2211.]

[33] 罗艳, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木河上游荒漠区4种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8326−8335. [Luo Yan, Gong Lu, Zhu Meiling, et al. Ecological stoichiometric characteristics of leaves and soil of four shrub species in the desert area of the upper reaches of the Tarim River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8326−8335.]

[34] 张晓龙, 郑元润. 荒漠河岸垂直沿河梯度上胡杨叶片碳氮磷化学计量变化特征及其环境解释[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(5): 1093−1099. [Zhang Xiaolong, Zheng Yuanrun. The stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in leaves of *Populus euphratica* on the vertical gradient of desert riparian and its environmental interpretation[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023, 29(5): 1093−1099.]

Leaf functional traits of typical desert plants in the sand-blocking and sand-fixing belt of the Hexi Corridor

CHAI Qiaodi, MA Rui, WANG Anlin, ZHANG Fu, LIU Teng, TIAN Yongsheng

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: In this study, the typical desert plants, *Haloxylon ammodendron* and *Nitraria tangutorum* in the sand-blocking and sand-fixing belt of the Hexi Corridor were studied, Through the combination of field survey, sample collection, indoor analysis and statistics, To explore the adaptation strategies of desert plants to arid environment. Select Minqin oasis the sand-blocking and sand-fixing belt and Gaotai oasis the sand-blocking and sand-fixing belt. The natural vegetation sealing protection zone from the upper direction and the downwind tree irrigation shelterbelt, and the sand resistance and sand fixation belt with consistent spatial structure characteristics, Set three 10 m×10 m *H. ammodendron* quadrats and three 10 m×10 m *N. tangutorum* quadrats. The spatial distribution characteristics of the main leaf parameters and the environmental factors were analyzed. It aims to provide data support for the evaluation of leaf functional traits in two desert plants. Results showed that, Typical desert plants can adapt leaf functional traits to soil and climatic conditions under specific habitat conditions: (1) Leaf dry material content (LDMC) and specific leaf area (SLA) were significantly different (P<0.05), Leaf organic carbon (LOC), leaf nitrogen (LN) and leaf phosphorus (LP) showed significant differences in the two habitats (P<0.001). (2) Principal component analysis as indicated, The top three index factors affecting the leaf traits of Minqin plants are LN, C:N and C:P; The top three index factors affecting the leaf traits of Gaotai plants are LP, C:N and N:P. (3) Redundancy analysis showed that, soil water content (SWC), soil organic carbon (SOC), and air dryness (AD) are the main limiting environmental factors affecting the functional traits of the two desert plants.

Keywords: the sand-blocking and sand-fixing belt; typical desert plants; leaf functional traits; environmental factors; Hexi Corridor